

Article, Published Version

Linde, Georg

Baugrunderkundung durch Drucksondierungen - Geräte, Ergebnisse und Auswertung

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106052>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Linde, Georg (1964): Baugrunderkundung durch Drucksondierungen - Geräte, Ergebnisse und Auswertung. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 12. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 101-138.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



164
4) 624, 134, 35

Baugrunderkundung,
Sondierungen

Baugrunderkundung durch
Drucksondierungen
Geräte, Ergebnisse und Auswertung

Ing. Georg L i n d e

15 Qm

1. Allgemeines

Die mit zunehmendem Baugeschehen immer mehr an Bedeutung gewinnende Forderung nach wirtschaftlichster, aber dabei doch sicherer Gründung der unterschiedlichsten Bauwerke einerseits und die ständig sich erweiternden Kenntnisse über das Verhalten der Untergrundschichten bei deren Beanspruchung durch diese Bauwerke andererseits, führten besonders in den letzten vier Jahrzehnten zu einer starken Zunahme des Umfanges der Baugrunduntersuchungen. Ziel dieser Untersuchungen ist, neben der Erkundung der Schichtenfolge und des Verlaufes der einzelnen Schichten, die Ermittlung spezieller erdstoffphysikalischer Kennwerte, die das Verhalten der einzelnen Erdarten unter den besonderen Beanspruchungen durch das Bauwerk charakterisieren und zur Durchführung der erforderlichen Standsicherheitsnachweise benötigt werden.

Die Ermittlung solcher Kennwerte erfolgt im allgemeinen im Laboratorium durch die Untersuchung ungestört im Bohrloch oder in einer Schürfgrube entnommener Erdproben. Derartige Untersuchungsbohrungen müssen, wenn sie ihren Zweck erfüllen sollen, äußerst sorgfältig ausgeführt werden und sind sehr zeit- und kostenaufwendig. Ebenso erfordert die Entnahme ungestörter Proben und ihre Untersuchung im Labor einen hohen Geld- und Zeitaufwand. Es ist daher verständlich, daß die zur Erkundung der Untergrundverhältnisse eines Bauwerkstandortes notwendigen Aufschlußbohrungen sehr sparsam angesetzt und die Laboruntersuchungen möglichst nur auf einige wenige charakteristische Proben beschränkt werden. Ein solches Vorgehen birgt aber schon von vornherein einige Unsicherheiten hinsichtlich einer richtigen Beurteilung der Bauwerkstandsicherheit in sich und kann zu einer unzweckmäßigen Ausführung der Gründung und dabei zu einer Kosten-erhöhung führen.

Es werden deshalb schon seit längerer Zeit andere Verfahren benutzt, die auf billigere und schnellere Art und Weise eine Erkundung des Baugrundes ermöglichen und den oben geschilderten Untersuchungsprozeß sogar teilweise ersetzen sollen. Letzteres ist besonders für rein sandige und kiesige Schichten wichtig, aus denen bis heute noch keine einwandfrei ungestörte Probeentnahme möglich ist. Zu diesen Untersuchungsverfahren gehören in erster Linie die Sondierungen.

Als Sondierungen werden die Verfahren bezeichnet, bei denen aus den Eindringungswiderständen eines in den Untergrund eingetriebenen

Stahlstabes auf die Eigenschaften der jeweils durchfahrenen Schicht geschlossen wird. Infolge einer fortlaufenden Messung der Eindringungswiderstände können Veränderungen der Konsistenz bzw. Lagerungsdichte in ein und derselben Schicht, weiche und weniger tragfähige Schichten, Hohlräume und Hindernisse leicht entdeckt werden.

Sondierungen sind daher mit Vorteil bereits vor der Durchführung der eigentlichen Aufschlußbohrungen anzuwenden, da sie Hinweise auf besonders kritische Stellen im Untergrund, auf besonders ungünstige Schichten usw. geben. Mit Hilfe der Sondiererergebnisse können im voraus die zweckmäßigsten Bohransatzpunkte und die Tiefen angegeben werden, aus denen ungestörte Proben zu entnehmen sind. Der Gesamtaufwand für die Baugrunduntersuchungen kann daher oft erheblich herabgesetzt und die Aussagekraft der Ergebnisse erhöht werden.

Aus der Zusammenfassung einer mehr oder weniger größeren Anzahl von Sondiererergebnissen lassen sich der günstigste Standort des geplanten Bauwerkes und die zweckmäßigste Gründungsausführung angeben, weil sie einen guten Überblick über die Tiefenlage der tragfähigen Schichten vermittelt.

Für den Einsatz von Sonden bieten sich weiterhin besonders vorteilhaft an: die Erkundung schwieriger Trassenabschnitte für Straßen, Eisenbahnen, Kanäle usw., die Erkundung von Vorkommen bestimmter als Baumaterial zu verwendender Erdarten und die Überprüfung der bei Aufschüttungen erzielten Verdichtung.

Da es bei der Projektierung von Bauwerksgründungen aber nicht nur auf die Entscheidung ankommt, ob das geplante Bauwerk an der untersuchten Stelle errichtet werden kann oder nicht, sondern auch darauf, in welcher Höhe der Baugrund belastet werden darf und welche Bauwerksbeeinflussungen dann zu erwarten sind, ist in den letzten Jahren mit einigem Erfolg versucht worden, neben den bisher erwähnten qualitativen Deutungen auch quantitative Aussagen aus den Sondiererergebnissen zu erhalten.

2. Überblick über die heutigen Sondierverfahren

Die heute in der Praxis üblichen Sondierverfahren sind:

- a) Die Rammsondierungen, bei denen das Eintreiben eines Stahlstabes (der Sonde) durch die Schlagwirkung eines mit konstanter Fallhöhe arbeitenden Schlaggewichtes erfolgt und aus der für eine bestimmte Eindringtiefe ermittelten Schlagzahl auf die

Eigenschaften der Erdschicht geschlossen wird.

- b) Die Drucksondierungen, bei denen die Sonde mit konstanter Geschwindigkeit in den Untergrund eingedrückt wird und die erforderlichen Eindrückkräfte als Kriterium für die Eigenschaften der jeweils von der Sondenspitze durchfahrenen Erdschichten benutzt werden.

Dieses Sondierverfahren wird in diesem Beitrag ausführlicher behandelt.

- c) Die Sondierungen, bei denen aus der Größe der Absorption von Gammaphotonen die Dichte des in verschiedenen Tiefen bestrahlten Erdreiches ermittelt wird.

(Die Gammastrahlensonden sind in einem besonderen Beitrag dieses Heftes eingehend dargestellt).

- d) Die Drehsondierungen, bei denen ein in den Untergrund eingetriebenes Flügelkreuz (langsam) gedreht und aus dem gemessenen Maximaldrehmoment die Scherfestigkeit weicher, bindiger Erdstoffe unter schneller Schubbelastung ermittelt wird.

Die Dreh- oder Flügelsondierungen sind wegen der nur beschränkten Einsatzmöglichkeiten in weichen, bindigen Erdarten u.a. auch in Deutschland bisher wenig zur Anwendung gekommen, zumal die mit ihnen ermittelten Scherfestigkeiten für Schnellbelastung sich nicht zur Berechnung der Dauerstandfestigkeit eignen. Außerdem lassen sich aus den in Frage kommenden Erdarten ohne größere Schwierigkeiten ungestörte Proben entnehmen, die dann einer labormäßigen Untersuchung unter den örtlich gegebenen Bedingungen zugänglich sind. Trotzdem sollte auch diesen Sonden im Interesse einer wirtschaftlicheren Baugrunderkundung künftig mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden, wenn es sich um einen entsprechend geeigneten Untergrund und um Stabilitätsberechnungen handelt, denen die einfache $\varphi = 0$ -Analyse zugrunde gelegt werden kann.

Das Älteste und wegen des geringen Aufwandes sowie der einfachen Handhabung des Gerätes auch heute noch am meisten eingesetzte Sondierverfahren ist die Rammsondierung. Dieses Verfahren weist einige grundsätzliche Mängel auf, die nachfolgend kurz dargestellt werden sollen:

1. Die dynamischen Vorgänge beim Einrammen der Sonde führen zu komplizierten Spannungs- und Verformungsverhältnissen im Untergrund,

die schwer erfaßbar sind und in keiner Weise den Verhältnissen unter der statischen Last eines Bauwerkes entsprechen. Eine Deutung der gewonnenen Ergebnisse im Hinblick auf das Verhalten der Erdschichten bei rein statischer Belastung ist daher erschwert.

2. Die plötzlich auftretende Schlagbeanspruchung durch die Rammsonde kann auch in den verhältnismäßig stark wasserdurchlässigen Sanden zur Entstehung eines Porenwasserüberdruckes führen, sofern sich die Sande unterhalb des Grundwasserspiegels befinden, also wassergesättigt sind. Wenn der Porenwasserüberdruck auch nur im Augenblick des Rammschlages voll wirksam ist, so kann er doch das Ergebnis der Sondierung beeinflussen. Für Feinsande ist nachgewiesen worden [1,7], daß die zur Erreichung einer bestimmten Eindringtiefe notwendige Schlagzahl durch den auftretenden Porenwasserüberdruck unter sonst gleichen Bedingungen um 15 % abgemindert wurde. Dieser Einfluß erhöht sich stark mit der Abnahme der Wasserdurchlässigkeit der untersuchten Erdart.
3. Bei den von der Geländeoberfläche aus eingesetzten Rammsonden nimmt mit zunehmender Sondiertiefe und damit wachsender Gestängelänge das Verhältnis zwischen Schlagenergie des Rammhämmer und geschlagener Masse der Sonde laufend ab, wodurch der zum Eintrieb der Sonde wirksam werdende Anteil der Schlagenergie kleiner ausfällt. Es ist also kein einheitlicher Vergleichsmaßstab zur Einschätzung der Eigenschaften von flach- und tiefliegenden Schichten mehr vorhanden. Die Berücksichtigung dieser Einflüsse ist zwar theoretisch durch Rammformeln möglich, führt wegen der oft diskutierten Mängel der Formeln aber praktisch zu keiner Besserung. Mit der Entwicklung von sogenannten Bohrlochsonden ist ein Weg beschritten worden, den vorerwähnten Mangel auszuschalten. Diese arbeiten stets unter den gleichen dynamischen Bedingungen, solange sich der Rammhämmer in einem mit gleichem Medium erfüllten Raum bewegt. Das bedeutet, daß nur die beim Einsatz oberhalb des Grundwasserspiegels gewonnenen Ergebnisse oder die unter Wasser erhaltenen miteinander vergleichbar sind. Um zu einer von der Einsatztiefe unabhängigen einheitlichen Vergleichsbasis zu kommen, ist die Rammeinrichtung bei einigen Bohrlochsonden mit einem wasserdicht schließenden Mantel umgeben worden.
4. Bei Sondierungen mit den üblichen unverrohrten und von der Geländeoberfläche aus eingesetzten Rammsonden tritt trotz verdickter

Sondenspitze in bestimmten Erdarten eine erhebliche Mantelreibung auf, die besonders bei größerer Dicke dieser Schichten zu einer Überbewertung der Festigkeitseigenschaften aller tiefer liegenden Schichten führen kann. Zu diesen Erdarten gehören besonders Ton, weiche und hochplastische Schluffe, Erdstoffe organischen Ursprungs und auch Feinsande unterhalb des Wasserspiegels. Das Auftreten dieser Mantelreibung und die bereits geschilderte Veränderung der dynamischen Bedingungen sprechen dafür, die gewöhnlichen Rammsonden nur bis in geringere Sondiertiefen einzusetzen.

Um den Einfluß der Mantelreibung aufzuheben, sind verrohrte Rammsonden gebaut worden, die eine exakte Trennung des Gesamteindringungswiderstandes in Spitzeneindringungswiderstand und Mantelreibung ermöglichen. Diese Sonden erfordern aber einen erheblichen Aufwand und erlauben nur einen verhältnismäßig geringen Sondierfortschritt, da Sonde und Ummantelungsrohr getrennt eingetrieben werden müssen.

Die bereits erwähnten Bohrlochsonden sind ebenfalls weitestgehend frei von Mantelreibungseinflüssen, da sie nur eine relativ kurze Sondenstange von maximal 1,5 m Länge besitzen.

3. Entwicklung der Drucksonden

Die bei der dynamischen Beanspruchung der Untergrundschichten durch die Rammsonde auftretenden komplizierten Vorgänge und die hierdurch erschwerte Deutung der Sondiererergebnisse einerseits, sowie andererseits der Wunsch, auch in größeren Sondiertiefen eindeutige Ergebnisse zu erhalten, führten auf den Gedanken, die Sonde mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit in den Untergrund einzudrücken.

Die Entwicklung der Drucksonden wurde seit 1936 besonders in Holland und Belgien gefördert, wo es wegen der dort häufig notwendigen Pfahlgründungen wichtig war, die Festigkeit des Untergrundes in größeren Tiefen zu kennen und wo man die Sondiererergebnisse von Anfang an benutzte, um die erforderlichen Pfahllängen und die zulässigen Pfahlbelastungen zu ermitteln. Wegen der speziellen Aufgabenstellung war es wünschenswert, nicht nur den vorhandenen Gesamteindringungswiderstand zu messen, sondern auch seine beiden Anteile Spitzenwiderstand und Mantelreibung zu kennen.

Die heute in diesen beiden Ländern benutzten Drucksonden bestehen aus dem Sondengestänge mit einer unten angesetzten Kegelspitze von

36 mm Durchmesser. Das Gestänge wird in einem Mantelrohr geführt. Der Außendurchmesser des Mantelrohres entspricht dem Durchmesser der Kegelspitze. Mantelrohr und Sondenspitze werden gleichzeitig in den Untergrund eingedrückt, wobei die nur durch das Gestänge bewegte Spitze dem Mantelrohr voraus läuft. Die Meßelemente - heute meist elektrische Geber - befinden sich oberhalb des Geländes und sind so eingerichtet, daß der Gesamteindringungswiderstand und gesondert der Spitzeneindringungswiderstand gemessen werden können.

Die zweiteilige Ausführung der Sonde, bei der sich Spitze und Mantel getrennt bewegen, schließt trotz besonderer Formgebung der Spitze (Bild 1) nicht aus, daß sich einzelne Erdkörner zwischen Spitze und Mantelrohr verklemmen können und hier zu einer Reibung zwischen beiden führen. Dies wirkt sich in zu hohen Meßwerten für den Spitzeneindringungswiderstand aus. Die Möglichkeit einer zwischen Gestänge und Mantelrohr auftretenden Reibung ist auch bei tieferen Sondierungen in einem Untergrund aus abwechselnd harten und weichen Schichten gegeben, weil die Sonde besonders dann leicht aus der Achsrichtung ausweicht.

Bereits während des Krieges entwickelte Hoffmann [2] eine Sonde, die die vorgenannten Fehlerquellen eliminiert. Sie besteht nur aus einem Rohr mit einer unten befestigten und als Meßelement ausgebildeten Spitze. Der Spitzeneindringungswiderstand wird aus der mit einem elektrischen Dehnungsmesser gemessenen Stauchung eines 10 cm langen Stahlhohlzylinders bestimmt. Da bei dieser Sonde der Spitzeneindringungswiderstand direkt an der Sondenspitze und nicht mehr oberhalb des Geländes gemessen wird, ist das Meßergebnis unbeeinflusst von Mantelreibungskräften und man erhält selbst bei großen Sondertiefen zuverlässige Werte. Diese Sonde wird als Spitzendrucksonde bezeichnet.

Kahl und Muhs [3] haben diese Spitze dann nach dem Kriege in Zusammenarbeit mit den Maihak-Werken Hamburg verbessert (Bild 2). Sie besteht nunmehr aus einem Stahlhohlzylinder, der je nach dem Spitzendruck mehr oder weniger stark elastisch gestaucht wird. Abhängig von der Größe der Stauchung wird die Eigenfrequenz einer in der Achse des Zylinders schwingfähig gespannten Saite verändert. Durch die Abstimmung dieser Frequenz mit der Frequenz einer im Meßgerät gespannten Saite ergibt sich eine Geräteablesung. Bei den

Älteren Meßgeräten erfolgt die Abstimmung von Hand und wird an einem Oszillographen kontrolliert. Die neueren Meßgeräte arbeiten mit selbsttätiger Abstimmung und gestatten neben einer Ablesung am Gerät auch das Ausdrucken der Meßwerte. Die Sondenspitze und das Empfangsgerät sind durch eine normale zweiaderige Leitung, die durch das Gestänge gezogen ist, miteinander verbunden.

Bei Überlastung der Spitze, wie sie beispielsweise beim Auftreffen auf einen größeren Stein vorkommen kann, ist eine Überbeanspruchung der Meßsaite nicht möglich, weil sie bei auftretenden Druckkräften entlastet wird. Der Stahlzylinder ist so dimensioniert, daß selbst größere Überschreitungen der angegebenen Höchstbelastung noch innerhalb des elastischen Bereiches liegen.

4. Die Spitzendrucksonde der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau

Die weiter oben bereits dargelegten Vorteile der Drucksondierungen gegenüber den Rammsondierungen gaben im Jahre 1960 den Anlaß, auch in der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau ein Drucksondiergerät zu entwickeln. Nachdem dieses Gerät nunmehr in einigen Einsätzen praktisch erprobt ist und sich durchaus bewährt hat, soll es einem größeren Kreis interessierter Baupraktiker vorgestellt werden.

4.1 Die Eindrückvorrichtung

Gegenüber den im allgemeinen mit verhältnismäßig einfachen Mitteln durchzuführenden Rammsondierungen haben alle Drucksondierungen den Nachteil, daß zum Eindrücken der Sonde eine relativ komplizierte Konstruktion erforderlich ist.

Die nach Angaben der Forschungsanstalt gebaute Eindrückvorrichtung ist als Einachshänger ausgebildet und bei einem Eigengewicht in einsatzbereitem Zustand von 1,2 Mp, für Eindrückkräfte bis zu 10 Mp ausgelegt. Um eine entsprechend hohe Widerlagerkraft zu erreichen muß der Hänger daher zusätzlich zu seinem Eigengewicht noch im Erdreich verankert werden. Die bisher durchgeführten Sondierungen zeigten, daß mit den vorhandenen, etwa 1,3 m tief in den Untergrund einzudrehenden Erdankern nur bei besonders günstigen Untergrundverhältnissen eine Eindrückkraft von 10 Mp ausgeübt werden kann. Im allgemeinen war bei einem locker bis mitteldicht gelagerten Sanduntergrund die Zugbelastung der Anker bereits bei Eindrückkräften

um 7,5 Mp erschöpft. Es ist vorgesehen, die Anker noch um etwa 1 m zu verlängern, womit wir glauben, die Zugbelastungsgrenze auch bei weniger günstigen Untergrundverhältnissen auf den notwendigen Wert steigern zu können.

Die Erdanker bestehen aus einem 30 mm starken Rundstahl mit einer unten aufgeschweißten Schnecke von 190 mm Durchmesser. Die Schnecke hat nur eine Windung mit einer Steigung von 60 mm. Das Eindrehen der Anker (Bild 4) erfolgt durch einen Zweitakt-Verbrennungsmotor der Firma Stihl, ebenso das Herausdrehen nach beendeter Sondierung. Hierbei hat sich die gewählte Formgebung des Ankers bisher gut bewährt.

Die Erdanker sind über aufgeschraubte Rohre, Keile mit Unterlegstücken und vier vorn und hinten je paarweise über das Chassis gelegte Traversen mit dem Drucksondiergerät zugfest verbunden (Bild 5).

Die auf die oberen Ankerenden aufgeschnittenen Gewindestrecken sowie die an unterschiedlichen Stellen in das Aufschraubrohr eingearbeiteten Schlitze zur Aufnahme der Keile lassen die Herstellung einer festen Verbindung im allgemeinen bei jeder beliebigen Höhe zwischen Geländeoberfläche und Niveaufläche der Traversen zu.

Bei Sondierungen in einem Untergrund geringerer Festigkeit oder bis in nur geringe Tiefen kann häufig auf die Verankerung verzichtet werden, da dann das Eigengewicht des Gerätes allein als Widerlagerkraft ausreicht.

Das eigentliche den Druck bzw. auch Zug auf die Sonde ausübende Bauelement ist eine Traverse, die an beiden Enden durch je eine Spindel geführt wird und mit diesen Spindeln über einen Vertikalbereich von etwa 1,4 m bewegt werden kann. Die Kraftübertragung von der Traverse auf das Sondengestänge erfolgt nicht direkt, sondern über zwei hydraulische Drucktöpfe zunächst auf eine untere Druckplatte. Letztere drückt dann auf das Gestänge, wobei eine aufgesteckte Gabel als Widerlager dient. Beim Ziehen der Sonde verläuft die Kraftübertragung von der Traverse über zwei Flachbandbügel auf die untere Druckplatte und von hier über die beiden Drucktöpfe auf eine obere Druckplatte. Der Anschluß des Gestänges erfolgt wie beim Drücken. Die Anordnung der beiden Druckplatten und der Drucktöpfe geht aus Bild 3 hervor.

Die in den Kraftübertragungsweg zwischen Traverse und Gestänge eingeschalteten beiden Drucktöpfe mit zusammen 77 cm² Querschnittsfläche

ermöglichen die hydraulische Messung der auf das Gestänge ausgeübten Gesamtdruck- bzw. -zugkräfte. Ein in die untere Druckplatte eingebahter Kanal verbindet die beiden Drucktöpfe und sorgt stets für eine gleichmäßige Belastung der gesamten Kolbenfläche. Das Ablesen des Flüssigkeitsdruckes erfolgt durch Feinmeßmanometer, die in einem besonderen Kasten untergebracht und durch einen flexiblen Druckschlauch an das Hydrauliksystem der Traversen angeschlossen sind. Die Verwendung von drei Manometern mit unterschiedlichen Meßbereichen soll eine möglichst genaue Ablesung garantieren. Die einzelnen Manometer können je nach Höhe der auftretenden Kräfte ein- bzw. abgeschaltet werden. In dem Manometerkasten sind außerdem ein kleiner Tank für die verwendete Bremsflüssigkeit und eine Handpumpe untergebracht, die zum Füllen der gesamten Meßeinrichtung dient (Bild 6).

Der ursprünglich zum Messen der Gesamteindrückkraft verwendete Kraftmeßbügel hat sich nicht bewährt, da eine sichere Ablesung wegen ständiger Zeigervibrationen nicht möglich war.

Die beiden Spindeln werden durch eine Rahmenkonstruktion gehalten. Sie sind oben gegen ein Drucklager abgestützt. Der Antrieb erfolgt durch den bereits erwähnten Verbrennungsmotor, der zu diesem Zweck in eine besondere Halterung eingesetzt wird (Bild 7). Der Motor mit einer Leistung von 8 PS besitzt zwei Anschlußwellen, die verschieden untersetzt sind. Die Wellen können wahlweise zum Antrieb der Spindeln benutzt werden, jedoch wird im Interesse eines möglichst kurzzeitigen Durchfahrens der "Totstrecken" im allgemeinen die mit der höheren Umdrehungszahl verwendet. Die sich selbst regulierende Kupplung des Motors macht das Anbringen einer besonderen Sicherung, die den Sondiervorgang bei plötzlich auftretender Gefahr einer Überlastung des Gerätes unterbricht, überflüssig, weil das erforderliche höhere Drehmoment nur von der Kupplung übertragen wird, wenn man die Drosselklappe ständig weiter öffnet. So erhält auch der unerfahrene Maschinist einen deutlichen Hinweis auf das starke Ansteigen des Sondierwiderstandes und kann den Sondiervorgang sofort unterbrechen, wenn das Manometer den zulässigen Höchstdruck anzeigt.

Die Steuerung des Umdrehungssinnes der Spindeln und damit der Bewegungsrichtung der Traverse erfolgt über ein umschaltbares Getriebe.

Das Sondengestänge wurde ursprünglich in drei Punkten geführt. Die unterste Führung liegt etwa 40 bis 50 cm über der Geländeoberfläche,

das zweite Führungselement ist die höhenveränderliche Traverse und der dritte Punkt befindet sich im Querriegel der Rahmenkonstruktion. Die durchgeführten Sondierungen zeigten jedoch, daß das mit höheren Drücken belastete Gestänge ausknickte, sobald sich die Traverse in den oberen Bereichen befand. Es wurde eine weitere Führung angebaut, die sich als Knicksicherung ausgezeichnet bewährte. Diese Knicksicherung ist zurückklappbar, so daß bei Bedarf mit der Traverse an ihr vorbeigefahren werden kann. Im Normalbetrieb braucht sie aber nicht entfernt zu werden.

Das Sondiergerät war von vornherein für eine Mehrzweckverwendung vorgesehen. Es eignet sich außer zur Durchführung von Spitzendrucksondierungen auch zum Eindringen einer Gammastrahlentiefsonde, zum Eindringen von Porenwasserdruckgebern und zum Eindringen von Entnahmegäräten für ungestörte Erdstoffproben. Letzteres ist allerdings nur im Zusammenhang mit normalen Bohrungen möglich.

4.2 Die Sonde (Bild 8)

Wesentlichster Bestandteil der verwendeten Sonde ist die Sondenspitze der Firma Maihak. Sie besitzt bei einem Durchmesser von 36 mm einen Meßbereich von 0 bis 5000 kp, der im allgemeinen auch für sehr dicht gelagerte Sandschichten und feste bindige Erdarten ausreicht. Die besonderen Vorteile dieser Spitze und ihr Meßprinzip sind bereits im dritten Abschnitt dargelegt worden. Als Meßgerät wird der neuere Typ MDS 4 verwendet, bei dem eine selbständige Frequenzabgleichung stattfindet und durch einen zusätzlichen Drucker die Meßergebnisse auf einem Papierstreifen registriert werden.

Die Stromversorgung der mit einer Betriebsspannung von 220 V arbeitenden Meßanlage erfolgt durch ein tragbares 1,5 kW-Aggregat, womit der Einsatz der Sonde unabhängig von dem örtlichen Versorgungsnetz erfolgen kann. Die bisher gemachten Erfahrungen zeigten, daß die Anlage sehr empfindlich auf Schwankungen der Betriebsspannung reagiert. Da in den örtlichen Versorgungsnetzen jedoch Spannungsschwankungen häufiger auftreten, besonders wenn in der näheren Umgebung noch elektrisch betriebene Großgeräte arbeiten, wird auf einen Anschluß an das öffentliche Stromnetz nach Möglichkeit verzichtet.

Das Sondiergestänge aus nahtlosem Spezialrohr besitzt einen Außendurchmesser von 30 mm und einen Innendurchmesser von 8 mm. Der gegenüber der Sondenspitze geringere Außendurchmesser soll das Auftreten einer Mantelreibung entlang des Gestänges möglichst verhindern. Dies hat wegen der Direktmessung des Spitzeneindringungswiderstandes allerdings keine meßtechnische Bedeutung, sondern vielmehr den Vorteil, daß der Gesamteindringungswiderstand und damit der für die Sondierung notwendige Arbeitsaufwand möglichst gering gehalten wird. Das Gestänge besteht aus einzelnen Teillängen, die miteinander verschraubt werden können und zu diesem Zweck an einem Ende mit einem Innengewinde, am anderen Ende mit einem Außengewinde versehen sind. Das gegenüber dem Außengewinde geringfügig längere Innengewinde gewährleistet ein festes Aufeinandersitzen der stumpfen Stoßflächen. Zum festen Anziehen der Verschraubung sind an beiden Enden Schlüsselflächen eingefräst, die gleichzeitig als Sitz für die zur Druckübertragung von der Traverse auf das Gestänge benutzte Gabel dienen. Die Länge der einzelnen Gestängeabschnitte beträgt 1,25 m und entspricht etwa der Hubhöhe der Traverse.

Da es zum besseren Erkennen unterschiedlicher Untergrundschichten vorteilhaft ist, auch die Größe der Mantelreibung zu kennen, wurde zwischen Sondenspitze und Sondiergestänge ein Gestängeteil angebracht, das den gleichen äußeren Durchmesser besitzt wie der Spitzenschaft und auf den eine Mantelreibung daher wirksam wird. Dieses Zwischenstück ist 40 cm lang und auf den oberen 6 cm konisch bis auf den Gestängedurchmesser verjüngt. Zusammen mit dem Sondenspitzenschaft beträgt die Fläche zur Messung der Mantelreibung rund 485 cm².

4.3 Sondiervorgang und Sondierergebnis

Das Eindringen der Sonde erfolgt durch abwechselndes Abwärts- und Aufwärtsfahren der Traverse, wobei jeweils bei der Abwärtsbewegung eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Traverse und Sonde hergestellt und damit die Sonde mitgenommen wird. Die Wegstrecke der Traverse entspricht dabei der Länge eines Gestängeabschnittes.

Die Sonde muß nach jedem Eindrückvorgang durch Aufschrauben eines weiteren Gestängeteiles verlängert werden. Es ist daher zweckmäßig, eine der endgültigen Sondiertiefe entsprechende Anzahl von Gestängeteilen vorher auf die Verbindungsleitung zwischen Sondenspitze und Meßgerät aufzufädeln und neben dem Sondiergerät abzulegen. Andern-

falls muß vor jeder Verlängerung die Verbindung zwischen Leitung und Meßgerät gelöst und nach dem Einfädeln der Einzelstange wieder hergestellt werden.

Das Eindringen des Gestänges kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt werden, erfolgt im allgemeinen aber gleichmäßig mit 40 cm/min, die in der TGL 11461 Bl. 3 als obere Grenze empfohlen sind.

Auf die Einhaltung einer gleichmäßigen Sondiergeschwindigkeit wird besonders beim Durchfahren bindiger, wenig wasserdurchlässiger Schichten geachtet, weil dies die Voraussetzung für ein annähernd gleichbleibendes Verhältnis zwischen der Größe des dort auftretenden Porenwasserüberdruckes und den wirksamen Spannungen ist. Damit bleiben die Meßwerte untereinander vergleichbar. Die sich durch den Eindruckvorgang zwangsläufig ergebenden Sondierpausen müssen daher aus den Sondieraufzeichnungen ersichtlich sein, jedoch kann nach einigen Zentimetern Gestängebewegung angenommen werden, daß sich die vor der Sondierpause bestehenden Spannungsverhältnisse wieder eingestellt haben.

Die Messung des Gesamteindringungswiderstandes und des Spitzeneindringungswiderstandes erfolgt in der Regel alle 20 cm. Die wirkliche Mantelreibung kann nur erhalten werden, wenn die Ablesung der beiden Meßwerte gleichzeitig erfolgt. Es wird daher vor der Sondierung festgelegt, daß die Messungen in den Zeitpunkten vorgenommen werden, in denen ein an der Traverse befestigter Zeiger bestimmte Marken auf einer fest angebrachten Skala - üblicherweise die geradzahligten Dezimeterstriche - erreicht.

Der Gesamteindringungswiderstand wird durch bloßes Notieren der zum Ablesezeitpunkt vorhandenen Manometeranzeige festgehalten. Die Maihak-Meßanlage für die Ermittlung des Spitzeneindringungswiderstandes wird rund 2 bis 3 cm vor Erreichen der Ablesemarke ein- und nach Überschreiten der Marke um den gleichen Betrag ausgeschaltet. Da das Gerät in der Sekunde etwa einen Meßwert selbsttätig ausdrückt, ergeben sich für jede Ablesetiefe 6 bis 9 Zahlen, von denen die besonders kenntlich gemacht wird, die zum Ablesezeitpunkt gerade erscheint. Durch die Folge von 6 bis 9 Meßwerten können zufällige Falschanzeigen erkannt und daher grobe Fehler ausgeschlossen werden.

Die nach jedem Eindruckvorgang erreichte Sondiertiefe ergibt sich aus den Anfangs- und Endstellungen des Zeigers vor bzw. nach den einzelnen

Eindrückvorgängen durch fortlaufende Addition der Ablesedifferenzen. Die zwischen den Anfangs- und Endstellungen liegenden Ablesetiefen müssen durch Differenzbildung zwischengerechnet werden.

Als Ergebnis einer Drucksondierung ergeben sich der Gesamteindringungswiderstand als Produkt aus der Manometerablesung und der Gesamtquerschnittsfläche der beiden Druckköpfe, vermehrt um das jeweilige Gestängegewicht und der Spitzeneindringungswiderstand aus der Beziehung

$$\left(\frac{1}{N_o^2} - \frac{1}{N_t^2} \right) \cdot k$$

worin N_o den Meßwert der unbelasteten Sonden Spitze

N_t den Meßwert in der Tiefe t und

k eine vom Herstellerwerk für die verwendete Sonden Spitze angegebene Eichkonstante bedeuten.

Zur Berechnung vorstehender Werte stehen entsprechende Zahlentafeln zur Verfügung, so daß dieser Arbeitagang verhältnismäßig wenig Zeit in Anspruch nimmt.

Zur Auswertung der Sondierergebnisse werden im allgemeinen der spezifische Spitzeneindringungswiderstand und die spezifische Mantelreibung, beide in kp/cm^2 , in Abhängigkeit von der Sondiertiefe aufgetragen (Bild 9). Die Mantelreibung ergibt sich dabei als Differenz zwischen dem Gesamteindringungswiderstand und dem Spitzeneindringungswiderstand.

4.4 Sondierleistung

Das Sondiergerät ermöglicht einen Sondierfortschritt von etwa 6 m/h, während beim Ziehen des Gestänges bis zu 8 m/h erreicht werden können. Auf beide Werte hat die Untergrundbeschaffenheit keinen Einfluß. Fast man die Leistungen für das Eindrücken und Ziehen des Gestänges zusammen, so ergibt sich eine Sondiertiefe von rd. 3,5 m/h, wobei auf das Eindrücken 34 min und auf das Ziehen 26 min entfallen.

Die Leistungsfähigkeit wird außerdem aber in erheblichem Maße beeinflusst von dem Verhältnis zwischen der reinen Sondierzeit und der Zeit, die zum Aufstellen, Abbauen, Umsetzen und Verankern des Gerätes notwendig ist.

Die erforderlichen Zeiten für die Nebenarbeiten sind etwa die folgenden:

- | | |
|--|--------|
| a) Einrichten des Drucksondiergerätes (Vertikalstellen der Sonde) einschl. Anschließen der notwendigen Zusatzgeräte | 0,5 h |
| b) Abklemmen der Zusatzgeräte und Herstellen der Fahrbereitschaft des Drucksondiergerätes | 0,25 h |
| c) Eindrehen der Anker und Anbringen aller Verankerungszubehöre | 1,0 h |
| d) Abbau der Verankerung und Ziehen der Erdanker | 1,0 h |

Hinzu kommen noch die Zeiten für das Umsetzen des Gerätes von einem Sondierpunkt auf einen anderen.

Unter Berücksichtigung der stündlichen Sondierleistungen von 3,5 m bedeuten daher

| | |
|---|----------------------|
| ein Umsetzen mit ca. 15 min Zeitaufwand für das | |
| Verfahren des Drucksondiergerätes | 3,5 m Sondierverlust |
| einmaliges Verankern | 7,0 m " |

Wegen des relativ hohen Leistungsverlustes durch eine Verankerung wird diese bei unbekannten Untergrundverhältnissen häufig erst vorgenommen, wenn der Gesamteindringungswiderstand über das Eigengewicht des Sondiergerätes ansteigt. Es soll auf diese Weise der Aufwand für die Verankerung in all den Fällen vermieden werden, wo allein das Eigengewicht des Sondiergerätes als Widerlagerkraft ausgereicht hätte und dies vorher nicht abgeschätzt werden konnte.

Der Sondiereinsatz erfordert mindestens 3 Arbeitskräfte, von denen eine für die Bedienung des Motors und die zwei anderen zur Bedienung der beiden Meßanlagen benötigt werden. Ein günstigerer Arbeitsablauf wird jedoch erreicht, wenn eine weitere Arbeitskraft zur Erledigung der zahlreichen Neben- und Vorbereitungsarbeiten zur Verfügung steht.

Während der An- und Abtransport des Gerätes stets mit einem Lkw erfolgen muß, können Umsetzungen auf der Baustelle von Hand vorgenommen werden, sofern das Gelände nicht zu hügelig ist, sich einigermaßen befahren läßt und die Entfernung zwischen den einzelnen Sondieransatzpunkten nicht mehr als etwa 100 m beträgt.

5. Auswertung der Sondierergebnisse

Der im Sondierdiagramm in Abhängigkeit von der Sondiertiefe aufgetragene Spitzeneindringungswiderstand ist als sehr zuverlässiger Maßstab für die Beurteilung der Festigkeitseigenschaften der von der Sonde durchfahrenen Schichten anzusehen. Die Mantelreibung hingegen kann

auch von Reibungskräften beeinflusst sein, die zwischen Gestänge und Erdreich infolge Abweichens der Sonde aus ihrer Achsrichtung oder infolge Zusammenfallens des Sondierloches oberhalb des verdickten Übergangsstückes auftreten. Ihre auf die Mantelfläche des Übergangsstückes bezogene Angabe ist dann nicht korrekt, weshalb sie auch nicht als exakter Meßwert angesehen werden kann.

5.1 Einflüsse auf das Sondierergebnis

Der Spitzeneindringungswiderstand wird bei den nichtbindigen Erdrarten wesentlich von dem Verdichtungsverhältnis beeinflusst. Beim Eindringen der Sonde wird eine dem Volumen der Sonde entsprechende Erdstoffmenge verdrängt und muß in das benachbarte Erdreich ausweichen. Letzteres wird bei diesem Verformungsvorgang auf Abscheren und Zusammendrückung beansprucht. Das Abscheren erfolgt entlang von Gleitflächen, in denen die einzelnen Erdkörner aneinander vorbeigleiten. Sie müssen daher zuvor aus ihrer Verspannung gelöst werden. Das Zusammendrücken geschieht im wesentlichen durch eine Umbildung des Korngefüges, wobei ebenfalls die zwischen den einzelnen Erdkörnern in deren Berührungsflächen wirkenden Verspannungskräfte überwunden werden müssen. Da die Verspannung der Erdkörner untereinander aber von dem Verdichtungsverhältnis abhängt, kann ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Zusammendrückbarkeit, dem Winkel der inneren Reibung und dem Verdichtungsverhältnis angenommen werden.

Die Größe der Verspannungskräfte wird außer von dem Verdichtungsverhältnis auch von der Kornrauigkeit, der Kornform und dem Ungleichförmigkeitsgrad beeinflusst. So ergeben sich bei gleichem Verdichtungsverhältnis höhere Eindringwiderstände, wenn die Kornrauigkeit zunimmt, die Kornform stärker von der Kugelgestalt abweicht oder der Ungleichförmigkeitsgrad größer wird. Allgemeingültige Angaben über den großemäßigen Einfluß der einzelnen Komponenten auf den Eindringungswiderstand liegen bisher nicht vor. Lediglich für den Ungleichförmigkeitsgrad sind einige Hinweise zu finden, die sich auf die Schlagzahlen der leichten Rammsonde beziehen [4, 7]. Sicher ist aber, daß der Eindringungswiderstand von den vorgenannten einzelnen Faktoren weit geringer beeinflusst wird als von dem Verdichtungsverhältnis.

Den vorangegangenen Ausführungen kann entnommen werden, daß der Reibungsbeiwert eines nichtbindigen Erdstoffes im wesentlichen von dem Verdichtungsverhältnis bestimmt wird. Setzt man ein konstant

bleibendes Verdichtungsverhältnis und damit einen konstanten Reibungsbeiwert voraus, so muß der Eindringungswiderstand linear mit der Sondiertiefe zunehmen, weil die wirksamen Spannungen aus der Erdauflast und damit die Scherfestigkeit ebenfalls linear anwachsen. Die Zunahme des Eindringungswiderstandes hängt dabei von dem Verdichtungsverhältnis ab und ist bei höherem Verdichtungsverhältnis größer als bei kleinerem.

Ein Einfluß des Grundwasserspiegels tritt bei Drucksondierungen in Sand- und Kiesschichten nicht spürbar in Erscheinung. Selbst in Feinsanden ist die Wasserdurchlässigkeit im allgemeinen noch groß genug, um bei der geringen Sondiergeschwindigkeit einen genügend schnellen Abfluß des überschüssigen Porenwassers zu ermöglichen. Aus diesem Grunde spielt die Einhaltung einer konstanten Sondiergeschwindigkeit in derartigen Schichten auch keine große Rolle. Der sich ausreichend schnell vollziehende Porenwasserausgleich läßt das Aufkommen eines Porenwasserüberdruckes nicht zu, weshalb die Größe der im Korngerüst wirksamen Spannungen während des Sondiervorganges immer bekannt ist. Aus den in nichtbindigen Schichten gemessenen Spitzeneindringungswiderständen können daher einige wesentliche Zusammenhänge und Aussagen abgeleitet werden.

Wird bei den nichtbindigen Erdarten der Eindringungswiderstand in hohem Maße von den Verdichtungsverhältnissen bestimmt, so hängt er bei den bindigen Erdarten Schluff und Ton im wesentlichen von der Zustandzahl (Konsistenz) ab. Wegen der bei diesen Erdarten meist auch oberhalb des Grundwasserspiegels vorhandenen Wassersättigung und wegen ihrer geringen Wasserdurchlässigkeit, ist aber während des Sondierens immer mit Porenwasserüberdruck zu rechnen. Es besteht daher keine Möglichkeit, die Sondierergebnisse zu einer verfeinerten Aussage über die tatsächlichen Festigkeitseigenschaften von Schluff und Tonschichten zu verwenden, weil der wirklich auf das Korngerüst einwirkende Anteil des Sondierwiderstandes unbekannt bleibt.

5.2 Qualitative Aussagen

Der Verlauf des Spitzeneindringungswiderstandes im Sondierdiagramm vermittelt unmittelbar einen Eindruck von den unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften des Untergrundes. Ein Wechsel zwischen Schichten mit stark voneinander abweichenden Festigkeiten fällt sofort durch größere, sich über verhältnismäßig kurze Eindringtiefen vollziehende Verände-

rungen des Spitzeneindringungswiderstandes auf. Häufig handelt es sich dabei gleichzeitig um einen Wechsel zwischen Schichten unterschiedlicher Erdarten. Das Sondierdiagramm weist aber auch Festigkeitsveränderungen in Schichten mit gleichbleibender Erdart deutlich aus.

Oft läßt die Form der Spitzendruckkurve Rückschlüsse auf die Art der durchfahrenen Erdschicht zu. Die durch Sedimentation entstandenen Kies- und Sandschichten sind infolge verschiedener Strömungsverhältnisse oft nach Korngröße und Lagerungsdichte in unterschiedlicher Wechselagerung abgesetzt worden und zeigen daher Zusammensetzungen, die vom Fein- bis zum Grobsand reichen und häufig kiesige Einlagerungen enthalten. Sie bringen bei der sehr empfindlichen Spitzendrucksonde spürbar schwankende Sondiererergebnisse, die sich in einem zick-zack-förmigen Verlauf der Spitzendruckkurve ausprägen. Die feinkörnigen Schluffe und Tone haben sich dagegen wesentlich gleichbleibender abgesetzt, weshalb sich in solchen Schichten im allgemeinen ein viel regelmäßiger Verlauf der Spitzendruckkurve ergibt.

Zur Unterscheidung der durchfahrenen Erdarten kann auch das Verhältnis des Spitzeneindringungswiderstandes zur Mantelreibung herangezogen werden. So zeigt sich im wesentlichen, daß dieses bei den nichtbindigen Erdarten größer ist als bei den bindigen. Natürlich versagt ein solches Kriterium, wenn aus bereits genannten Gründen auch am Gestänge Mantelreibungskräfte auftreten.

Bei der Ermittlung der Schichtwechsel aus den Sondiererergebnissen muß beachtet werden, daß wegen der Zusammendrückung des die Sonde umgebenden Erdreiches in diesem eine Spannungszunahme eintritt und sich Verformungen einstellen. Wie umfangreiche Versuche der Degebo in gleichförmigem feinsandigen Mittelsand ergaben [57], zeigen sich stärkere sichtbare Verformungen in einer Zone mit einem Durchmesser vom rd. 4-fachen des Sondendurchmessers. Unterhalb der Sondenspitze kann dieser Verformungsbereich als Halbkugel angenommen werden, deren Halbmesser dem 2-fachen des Sondendurchmessers entspricht und deren Mittelpunkt etwa im Schwerpunkt der Spitze liegt. Ein Einfluß des Verdichtungsverhältnisses wurde dabei nicht festgestellt. Weit außerhalb des sichtbaren Verformungsbereiches findet aber noch eine Spannungszunahme statt. Sie reichte in dichtem Sand etwa bis zum 15-fachen, im lockeren Sand bis zum 10-fachen des Sondendurchmessers. Aus diesen Feststellungen folgt, daß Grenzen zwischen Schichten geringerer Festigkeit und solchen größerer Festigkeit schon im Spitzeneindringungswiderstand

angezeigt werden, wenn sich die Spitze noch 35 bis 50 cm oberhalb der Schichtgrenze befindet.

Der Einfluß des Verdichtungsverhältnisses auf den Spitzeneindringungswiderstand wurde ebenfalls von der Degebo systematisch untersucht [6,7]. Als Ergebnis dieser in trockenen und erdfeuchten Fein- und Mittelsanden mit Ungleichförmigkeitsgraden zwischen 1,85 und 3,0 durchgeführten Untersuchungen ergab sich für Tiefen von 1,5 bis 2 m unter Gelände die folgende Einteilung:

Spitzendruck von 0 bis 50 kp/cm^2 : sehr lockere bis lockere Lagerung

Spitzendruck von 50 bis 100 kp/cm^2 : lockere bis mitteldichte Lagerung

Spitzendruck von 100 bis 150 kp/cm^2 : mitteldichte Lagerung

Spitzendruck von 150 kp/cm^2 und

mehr

: dichte bis sehr dichte Lagerung

Die angegebenen Tiefen wurden als untere Grenze des Bereiches gefunden, in dem das auf Zusammendrücken beanspruchte Erdreich teilweise noch nach oben ausweicht, ähnlich den Vorgängen beim Grundbruch. In diesem oberflächennahen Bereich wächst unter sonst gleichen Lagerungsbedingungen der Eindringungswiderstand sehr stark von Null auf den dem Verdichtungsverhältnis entsprechenden Wert an. Der Bereich wird umso größer, je dichter das Erdreich gelagert ist. Unterhalb der Grenztiefe nimmt der Eindringungswiderstand dann nur noch geringfügig mit der Tiefe zu, weshalb die vorgegebene Einteilung auch hier für die Beurteilung des Verdichtungsverhältnisses noch geeignet erscheint. Die in der Einteilung zur Charakterisierung des Verdichtungsverhältnisses benutzten Bezeichnungen entsprechen den definitionsgemäß festgelegten [7,7].

Für die bindigen Erdarten wurden bislang noch keine Zusammenhänge zwischen dem Spitzeneindringungswiderstand und deren Zustandszahl gefunden. Man kann aus den Sondiererergebnissen lediglich die Lage bindiger Schichten erkennen und muß sich auf relative Festigkeitsvergleiche beschränken.

Die Auswertung der Sondierdiagramme im Hinblick auf eine allgemeine qualitative Aussage über die Untergrundbeschaffenheit soll an zwei Beispielen gezeigt werden.

Im Bild 9 ist ein Sondierdiagramm dargestellt, das in einem Sanduntergrund mit einer eingelagerten 7 m dicken Schluffschicht erhalten wurde. Die Spitzendruckkurve zeigt einen in Oberflächennähe locker bis mitteldicht gelagerten Sand, dessen Verdichtungsverhältnis mit der Tiefe stetig zunimmt und bei 3 m ein Maximum erreicht. Die hier vorhandenen Spitzendrücke von mehr als 150 kp/cm^2 bedeuten eine dichte bis sehr dichte Lagerung. Unterhalb 3 m fällt der Spitzendruck wieder ab und erreicht bei 5 m Tiefe nur noch einen Wert um 40 kp/cm^2 , was einer lockeren Lagerung entspricht. Dieses geringe Verdichtungsverhältnis bleibt dann zwischen 5 und 7,7 m nahezu unveränderlich, wenn man die in diesem Bereich vorhandene Allgemeintendenz des Spitzendruckverlaufes in Betracht zieht. Die hier stark ausgeprägte Zick-Zack-Form der Spitzendruckkurve läßt auf eingelagerte gröbere Kiesanteile schließen.

Wegen der größenmäßigen Übereinstimmung der Sondierwiderstände im Übergangsbereich zwischen der Sand- und der Schluffschicht ist die obere Grenze des Schluffes nicht durch einen ausgeprägten Sprung der Spitzendruckkurve ausgewiesen. Auffallend ist der ab 7,7 m einsetzende ziemlich gleichmäßige Verlauf der Kurve, wie er im allgemeinen in feinkörnigen bindigen Erdschichten erhalten wird. Die Tiefe von 7,7 m ist daher als obere Begrenzung der Schluffschicht anzusehen.

Sehr deutlich dagegen ist die untere Schluffgrenze markiert. Der Spitzendruck steigt hier sehr steil von 20 kp/cm^2 auf einen Wert um 200 kp/cm^2 an. Der schroffe Übergang von der relativ weichen Schluffschicht in eine dicht bis sehr dicht gelagerte Sandschicht macht die Berücksichtigung der der Sondenspitze vorauslaufenden Spannungszunahme notwendig. Wird der von der Spannungszunahme betroffene Bereich unterhalb der Sondenspitze mit einer Weite von 36 cm angenommen, so ergibt sich für die untere Schluffgrenze etwa eine Tiefe von 14,8 m.

Die Mantelreibung ist - wie zuvor erwähnt - nur bedingt als Aussagekriterium verwendbar. Im vorliegenden Beispiel kann eine relative Zunahme der Mantelreibung gegenüber dem Spitzendruck in dem an den Schluff angrenzenden 3 m starken Bereich der oberen Sandschicht festgestellt werden. Dies ist auf die dort vorhandenen gröberen kiesigen Einlagerungen zurückzuführen. Die eindringende Sonde wird durch geringe seitliche Ausweichbewegungen möglichst den Fugen zwischen den gröberen Anteilen zu folgen versuchen, wobei die Mantelreibung ent-

lang des verdickten Übergangsstückes naturgemäß zunimmt. Der Verlauf der die Mantelreibung kennzeichnenden Kurve entspricht in dieser Zone im wesentlichen dem Verlauf der Spitzendruckkurve, wenn der durch die bauliche Ausführung bedingte höhenmäßige Versatz beider Kurven um etwa 20 cm berücksichtigt wird.

Innerhalb der Schluffschicht nimmt die Mantelreibung stetig zu. Der Schluff hat demnach eine noch weichplastische Konsistenz, die den Zusammenschluß des Sondierloches nach dem Durchgang der verdickten Bauteile der Sonde (Spitze und Übergangsstück) ermöglichte und wodurch eine ständig zunehmende Länge des Sondengestänges von einer Mantelreibung beeinflusst wird. Die Zustandszahl (Konsistenzzahl) des Schluffes nimmt mit der Tiefe wahrscheinlich geringfügig ab, wie durch den größeren Zuwachs der Mantelreibung und durch den geringer werdenden Spitzendruck vermutet werden kann.

Der Grundwasserspiegel wurde im Sondierloch mit einer Gammastrahlen-Sonde in 6,4 m Tiefe ermittelt. Eine Beeinflussung des Spitzendruckes durch den Wasserspiegel konnte nicht festgestellt werden.

Die Sondierung liegt etwa 6 m von der Bohrung entfernt, weshalb die gefundenen geringen Tiefenunterschiede für die Schichtgrenzen durchaus erwartet werden konnten.

Das Diagramm des Bildes 10 zeigt die Ergebnisse einer Sondierung, die von der Sohle einer etwa 5 m tiefen Baugrube aus durchgeführt wurde. Die in der näheren Umgebung abgeteufte Bohrung wies bis in Tiefen um 13 m unter der Baugrubensohle vorwiegend grobsandige Kiese aus. Darunter befindet sich Sand. Das im Bild dargestellte Bohrprofil liegt rund 13 m von der Sondierung entfernt.

Aus den Sondierergebnissen kann abgeleitet werden, daß es sich im wesentlichen um einen nichtbindigen Untergrund aus größeren Erdstoffen handelt, für den der ausgesprochene Zick-Zack-Verlauf der Spitzendruckkurve typisch ist. Die Spitzendrücke liegen im allgemeinen bei Werten um 230 kp/cm^2 , was einer dichten bis sehr dichten Lagerung entspricht. Zwischen 3,2 und 6,6 m befindet sich ein Bereich mit erheblich geringeren Sondierwiderständen. Besonders zwischen 4,0 und 4,6 m fallen die Spitzendrücke bis auf Werte von nur 20 kp/cm^2 ab. Da derart niedrige Meßergebnisse in grobkörnigen Sandschichten im allgemeinen ungewöhnlich sind, kann hier auf das Vorhandensein eines Einschlusses aus bindigen Erdarten geschlossen werden. Die

steigende Tendenz der Mantelreibung zwischen 4,4 und 9 m sowie auch der etwas gleichmäßigere Verlauf der Spitzendruckkurve im fraglichen Bereich sprechen für die Vermutung. Es kann sich aber auch um eine eingelagerte Feinsandlinse mit nur geringem Verdichtungsverhältnis handeln. Der zwischen 16 und 17 m erkennbare starke Rückgang des Spitzendruckes hat vermutlich die gleiche Ursache.

Das Beispiel des Bildes 10 zeigt, daß die Sondierungen als wertvolle Ergänzung der nur aus Bohrungen gewonnenen Kenntnisse über die Untergrundbeschaffenheit anzusehen sind. Die durch die Sondierung ermittelte kritische Zone im Untergrund konnte durch die Bohrungen nicht nachgewiesen werden. Es wird in diesem Fall erforderlich sein, durch eine weitere, mindestens 8 m tiefe Bohrung die Art des eingelagerten Erdstoffes genau festzustellen und erforderlichenfalls eine ungestört entnommene Probe im Labor zu untersuchen.

Obwohl ein erfahrener Bearbeiter aus den Sondierungsergebnissen wichtige Schlußfolgerungen im Hinblick auf die allgemeine Untergrundbeschaffenheit ziehen kann, sollte sich eine Einschätzung grundsätzlich nicht allein auf Sondierungsergebnisse gründen. In jedem zu bebauenden Gelände ist mindestens eine Bohrung abzuteufen, die Auskunft über die Schichtungsverhältnisse gibt und anzeigt, in welchen Erdarten die Sondierungsergebnisse erhalten wurden. Die erste Sondierung wird hierzu zweckmäßigerweise in unmittelbarer Nähe der Bohrung durchgeführt. Ein Vergleich des durch Bohrerergebnisse vervollständigten Sondierdiagrammes mit den Ergebnissen aller weiteren Sondierungen ermöglicht dann eine sichere Einschätzung des gesamten erkundeten Geländes.

5.3 Quantitative Aussagen

So wertvoll eine allgemeine qualitative Aussage über die einzelnen Untergrundschichten auch sein mag, so darf nicht übersehen werden, daß selbst eine exakte Feststellung des Verdichtungsverhältnisses keine direkte Auskunft über das Verhalten des Erdstoffes unter der vom Bauwerk eingetragenen Lasteinwirkung gibt. Es ist deshalb besonders versucht worden, einen Zusammenhang zwischen dem Eindringungswiderstand der Sonde und der Zusammendrückbarkeit nichtbindiger Erdstoffe zu finden, der es gestattet, ausschließlich aus den Sondierungsergebnissen die unter einem Bauwerk zu erwartenden Setzungen zu ermitteln.

Nach Buisman [8] errechnet sich der Verdichtungsbeiwert aus der Beziehung

$$v = \frac{3w}{2p} \quad (1)$$

worin w den gemessenen Spitzendruck in kp/cm^2 und
 p' die in der Sondiertiefe wirksame lotrechte Spannung
(meist nur die Erdauflast)
bedeuten.

Der nach dieser Gleichung ermittelte Verdichtungsbeiwert ist unabhängig von der Art des nichtbindigen Erdstoffes und stellt einen unteren Grenzwert dar. Die daraus ermittelten Setzungen sind daher Größtwerte.

De Beer [9] führte für acht verschiedene Brücken in Belgien insgesamt 13 Setzungsberechnungen durch, bei denen er die nach Buisman aus den Sondierergebnissen ermittelten Verdichtungsbeiwerte benutzte. Durch Gegenüberstellung der berechneten und der am Bauwerk gemessenen Setzungen wies er die Brauchbarkeit des Verfahrens nach. Die gemessenen Setzungen lagen überwiegend unter den berechneten, wobei die größte Abweichung - bei absoluten Setzungsbeträgen zwischen 0,5 und 9,4 cm - etwa 50 % betrug. In drei Fällen lagen die berechneten Setzungen geringfügig unter den gemessenen Werten.

Die Ermittlung der Setzungen erfolgte nach der Gleichung

$$s = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{v} \quad 2,3 [\lg(p' + \Delta p) - \lg p'] \quad (2)$$

in der p' die Vertikalspannungen aus der Erdauflast und
 Δp die zusätzlichen Vertikalspannungen aus der Bauwerkslast
bedeuten.

Bild 11 zeigt ein Beispiel eines nach Buisman ausgewerteten Sondierdiagrammes, in dem die Veränderung des Verdichtungsbeiwertes mit der Tiefe dargestellt ist. Die gestrichelt eingetragenen Linien geben die für die Setzungsberechnung verwendeten, über einen gewissen Tiefenbereich gemittelten v -Werte an. Bei diesem Beispiel betrug die gemessene Setzung 3,7 cm, während 3,84 cm berechnet wurden.

Menzenbach [10] gibt für den Verdichtungsbeiwert an

$$v = \frac{C \cdot w^{0,85}}{p'} \quad (3)$$

Hierin stellt C eine von der Erdart abhängige Konstante dar, die wie folgt angenommen wird:

- C = 3 für Feinsand
- = 4 für Sand
- = 5 für Kies.

Die Gleichung (3) ist unter Verwendung eines sich nach einer gewissen Gesetzmäßigkeit mit der Lagerungsdichte verändernden Verhältnisses zwischen der Schlagzahl der amerikanischen Standardsonde und dem Spitzendruck der Drucksonde aus Sondiererergebnissen mit der Standardsonde abgeleitet worden. Sie stellt eine Näherung dar und liefert besonders für locker gelagerte Schichten mit geringen Spitzendrücken etwas höhere Verdichtungsbeiwerte als die Formel von Buismann. In dichtgelagerten Schichten stimmen die Ergebnisse beider Verfahren etwa überein.

Besondere Probleme treten immer wieder bei der Ermittlung der zulässigen Belastung für Gründungspfähle auf. Während bei Rammpfählen die zulässige Belastung näherungsweise aus Erfahrungswerten über die Eindringung pro Hitzschlag abgeschätzt werden kann (Rammformeln sind im allgemeinen nicht zugelassen), gibt es für Bohrpfähle nahezu keine Anhaltspunkte. Es werden daher häufig aufwendige Probelastungen erforderlich. Die sich bei einer Pfahlprobelastung und beim Eindringen einer Sonde im Untergrund vollziehenden gleichartigen Vorgänge führten dazu, speziell die Drucksondierung als Modellversuch einer Pfahlprobelastung anzusehen und aus den Drucksondiererergebnissen auf die zulässigen Pfahlbelastungen zu schließen.

Aus einem Vergleich der Ergebnisse von 14 Probelastungen mit den an gleicher Stelle erhaltenen Drucksondiererergebnissen kam van der Veen [11] zu folgendem Auswertverfahren:

Unter Annahme eines für die Tragfähigkeit des Pfahles maßgebenden Gleitflächenbereiches von $a \cdot D$ oberhalb und $b \cdot D$ unterhalb der Pfahlspitze (D = Pfahldurchmesser), läßt sich die zulässige Pfahlspitzenbelastung aus dem über den Bereich $(a + b) \cdot D$ des Sondierdiagramms gemittelten Spitzendruck (Bild 12) ableiten. Aus den Versuchen wurde für $a = 3,75$ und für $b = 1$ gefunden sowie weiterhin festgestellt, daß der gemittelte Spitzendruck nur mit wenigen Ausnahmen mehr als das 1,5-fache der Bruchspannung unter der Pfahlspitze betrug.

Werden der gemittelte Spitzendruck aus dem Sondierdiagramm mit w' und die Querschnittsfläche des Pfahlfußes mit F bezeichnet, so ergibt sich bei Zulassung einer Pfahlbelastung von 60 % der Bruchlast:

$$P_{zul} = \frac{1,5 \cdot w' \cdot 60}{100} F$$

oder

$$P_{zul} = \frac{w' \cdot F}{2,5} \quad (4)$$

Der Nenner der Gleichung (4) hat die Bedeutung eines Sicherheitsfaktors.

Menzenbach [12] untersuchte diesen Auswertungsvorschlag eingehender, wobei er die Ergebnisse von 70 Probelastungen mit den hierfür vorliegenden Drucksondiererergebnissen verglich. Mit Hilfe der Fehler- und Wahrscheinlichkeitsrechnung stellte er fest, daß 4/5 aller Pfähle mit weniger als 60 % der Bruchlast in Anspruch genommen sind und daher noch über Tragreserven verfügen. Mit nur 2 % Wahrscheinlichkeit wird die Bruchlast bis zu 80 % in Anspruch genommen. Er hält daher einen Sicherheitsfaktor von $\gamma = 2,5$ für durchaus vertretbar und eine früher von van der Veen vorgeschlagene Erhöhung auf $\gamma = 3$ nicht für erforderlich.

Im vorgenannten Auswerteverfahren wird ein Einfluß der Querschnittsfläche des Pfahlfußes auf das Verhältnis zwischen gemitteltem Spitzendruck aus dem Sondierdiagramm und Bruchspannung unter dem Pfahlfuß nicht berücksichtigt. Besonders Kerisel [13] und de Beer [14] stellten aber fest, daß die Größe der Pfahlquerschnittsfläche einen merklichen Einfluß auf dieses Verhältnis ausübt. Menzenbach [15] kam später wiederum durch eingehende Vergleichsuntersuchungen an 88 Pfählen zu dem folgenden Berechnungsvorschlag:

$$P_{zul} = \frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{1}{\gamma_2} \cdot \frac{w' \cdot F}{1000} \quad (5)$$

In vorstehender Gleichung sind zwei Sicherheitsfaktoren γ_1 und γ_2 enthalten, von denen γ_2 das gewohnte Verhältnis P_g/P_{zul} darstellt (P_g = Grenzbelastung). γ_1 ist abhängig von der Querschnittsfläche des Pfahlfußes und der Höhe des gemittelten Spitzendrucks aus der Sondierung (Bild 13).

Auf die umfangreichen Untersuchungen von Kerisel und de Beer, die speziell den Einfluß des Pfahlfußquerschnittes auf das Verhältnis zwischen Sondierwiderstand und Bruchspannung unter der Pfahlspitze

behandeln, soll hier nicht näher eingegangen werden.

6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit richtet sich besonders an den Projektierungsingenieur und soll ihn mit einer in der DDR bisher wenig angewandten Baugrunduntersuchungsmethode bekanntmachen. Mit dem ausführlich beschriebenen Spitzendrucksondiergerät kann in relativ kurzer Zeit ein größeres Baugelände hinsichtlich seiner Untergrundbeschaffenheit untersucht werden. Neben einer allgemeinen qualitativen Einschätzung ist auch die Angabe einiger spezieller erdstoffphysikalischer Kennwerte möglich. Mit der Spitzendrucksonde steht dem Projektanten ein Gerät zur Verfügung, das ihm bei wenig Zeit- und Geldaufwand umfassende Kenntnisse über den zu bebauenden Untergrund vermittelt. Er ist damit in der Lage, seine Konstruktionen den (zufälligen) Unregelmäßigkeiten des Baugrundes besser anzupassen und die hierfür wirtschaftlichste Lösung zu finden.

Im Rahmen der für die Anfertigung der Arbeit zur Verfügung stehenden Zeit konnte unmöglich die vorhandene umfangreiche Literatur über dieses Stoffgebiet ausgewertet werden. Die Darstellung der Auswerteverfahren mußte deshalb auf wesentliche Punkte beschränkt bleiben. Sicher ist, daß die Auswertungsmöglichkeiten der Sondierergebnisse noch erweitert und vor allem verfeinert werden können. Es muß daher weiter Aufgabe sein, durch möglichst zahlreiche Vergleichsuntersuchungen zwischen Sondierergebnissen und Ergebnissen anderer Untersuchungsverfahren für ständig neue Erkenntnisse zu sorgen.

Literaturverzeichnis

- [1] MENZENBACH: Die Anwendbarkeit von Sonden zur Prüfung der Festigkeitseigenschaften des Baugrundes
Forschungsberichte des Landes Nordrhein - Westfalen, Nr. 713, S. 106
Köln und Opladen 1959, Westdeutscher Verlag
- [2] MUHS: Arbeiten der DEGEBO in den Jahren 1938 bis 1948
Bautechnik - Archiv, Heft 3, S. 21
Berlin 1949, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn
Patentanmeldung Nr. H 169653 v.6.10.1942
- [3] KAHL und MUHS: Über die Untersuchung des Baugrundes mit einer Spitzendrucksonde
Die Bautechnik 29 (1952)
Heft 4, S.81
- [4] SPARMANN: Die leichte Rammsonde
Deutsche Bauakademie: Schriftenreihe Verkehrs- und Tiefbau 242.13
Berlin 1963, VEB Verlag für Bauwesen
- [5] siehe [3]
- [6] KAHL: Derzeitiger Stand des Spitzendruck-Sondierverfahrens
Schriftenreihe Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D, Heft 25
Grundbau, Teil II, S. 29, 1955
- [7] SCHULTZE und MUHS: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, S. 200
Berlin, Göttingen, Heidelberg 1950
Springer - Verlag
- [8] DE BEER: Grondmechanica, Teil II, S.162
Brüssel 1949, Standard Boekhandel

- [9] DE BEER: Settlement Records on Bridges founded on Sand
Proceedings of the 2. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
Rotterdam 1948, Bd. II, S. 111
- [10] siehe [1], S. 120
- [11] VAN DER VEEN: The Bearing Capacity of a Pile Pre-determined by a Cone Penetration Test.
Proceedings of the 4. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
London 1957, Bd. II, S. 72
- [12] siehe [1], S. 52
- [13] KERISEL: Mesures in Situ pour Déterminer la Portance d'une Fondation: Interpretation des Résultats du Penétromètre.
Caliers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Nr. 30, S. 251
Paris 1957
- [14] DE BEER: The Scale Effect in the Transposition of the Results of Deep - Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Caisson Foundation
Geotechnique 13 (1963), Nr. 1, S. 39
- [15] MENZENBACH: The Determination of the Permissible Point - load of Piles by Means of Static Penetration Tests
Proceedings of the 5. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
Paris 1961, Bd. II, S. 95

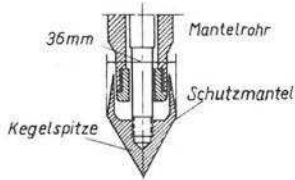


Bild 1

Spitze der holländischen
Drucksonde

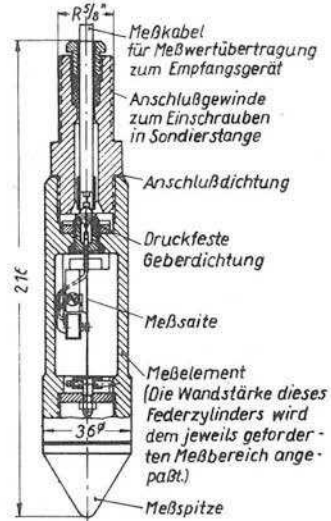


Bild 2

Spitze der Maihak-Werke

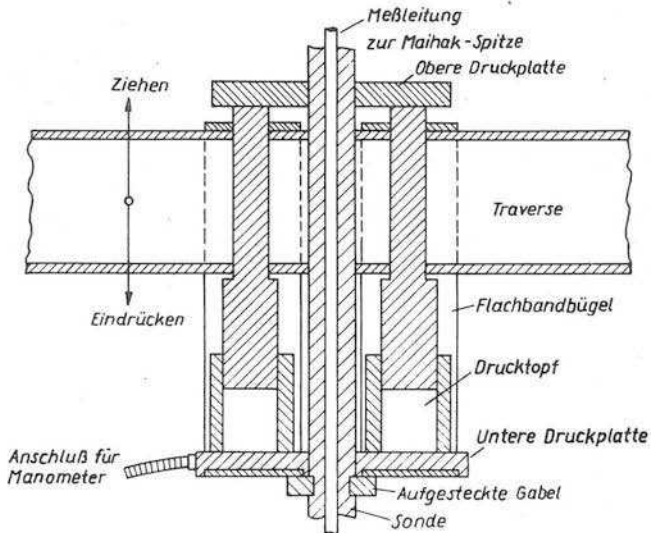


Bild 3

Traverse mit Kraftübertragungselementen zur Sonde



Bild 4

Maschinelles Eindrehen eines Erdankers

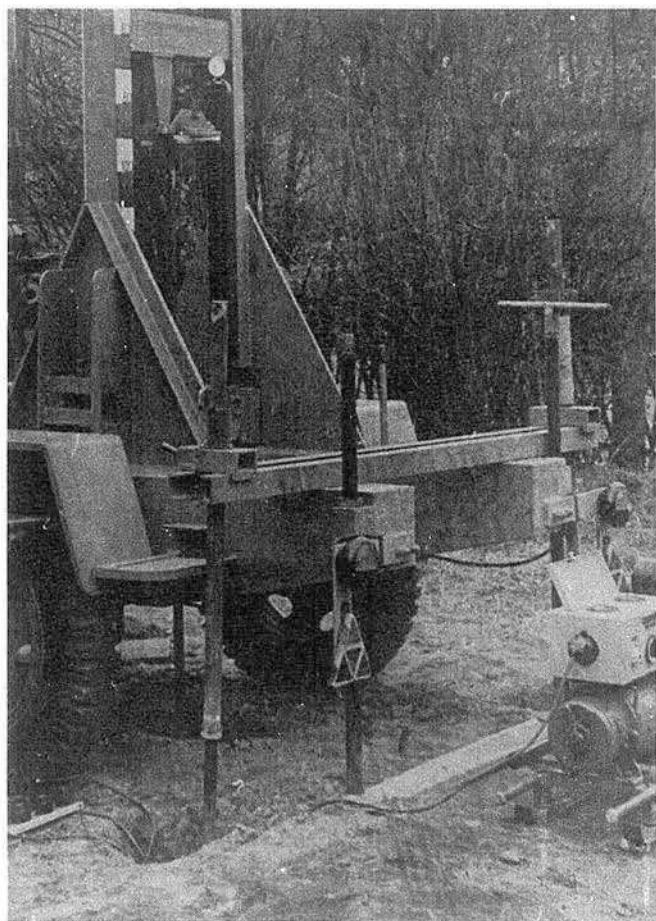


Bild 5

Rückwärtige Verankerung des Sondiergerätes

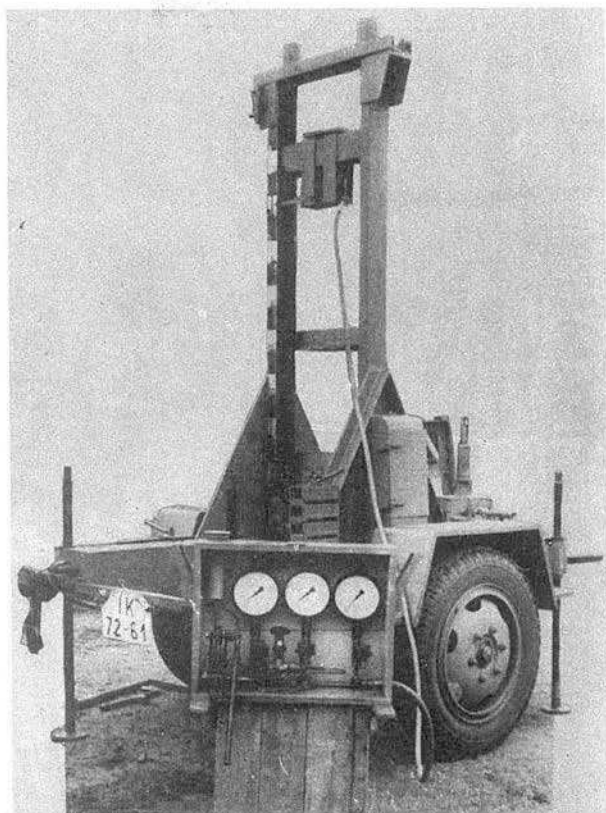


Bild 6

Manometer zur Messung des Gesamt-
eindringungswiderstandes

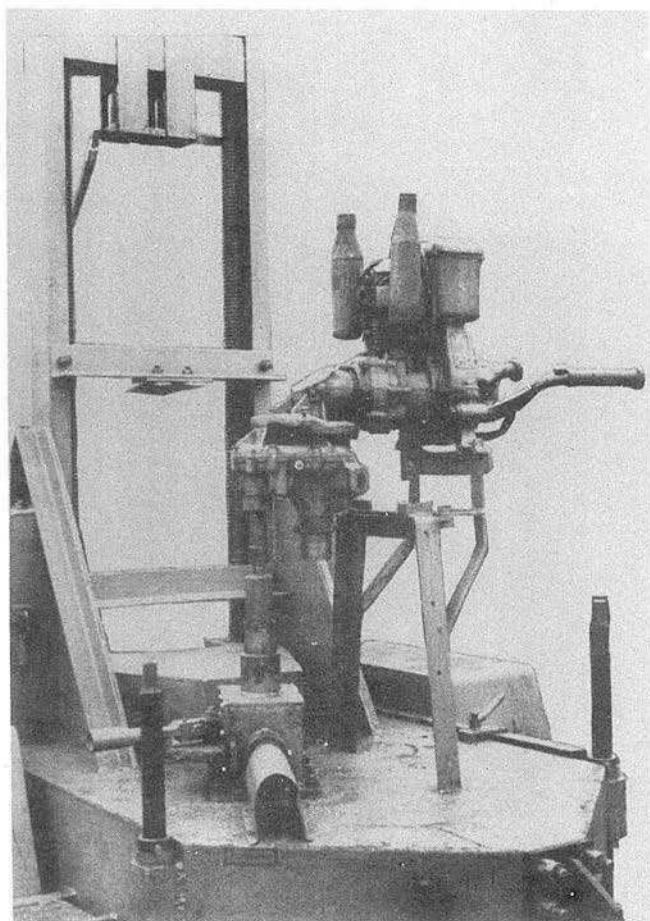


Bild 7

Auf Sondiergerät aufgesetzter Stihl-Motor

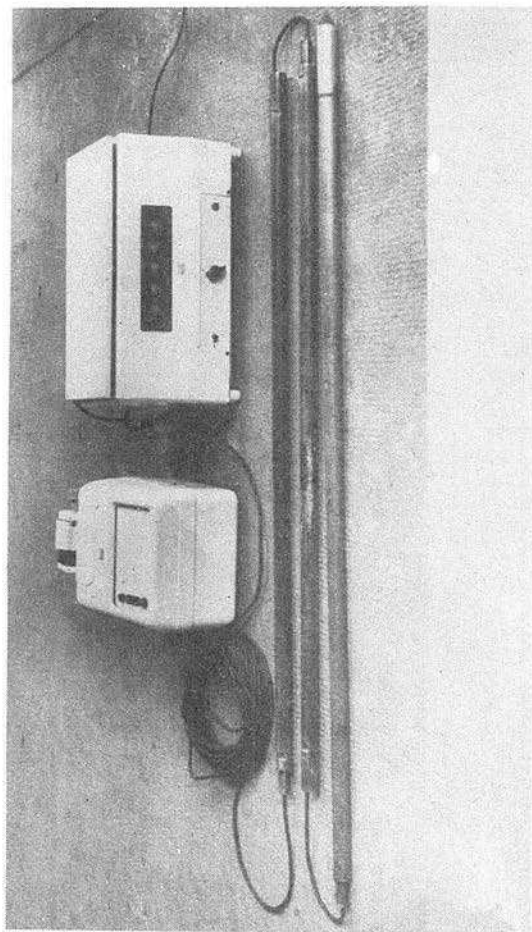


Bild 8

Sonde mit Meihak-Meßanlage und Meßwertdrucker

Bohrung

Drucksondierung

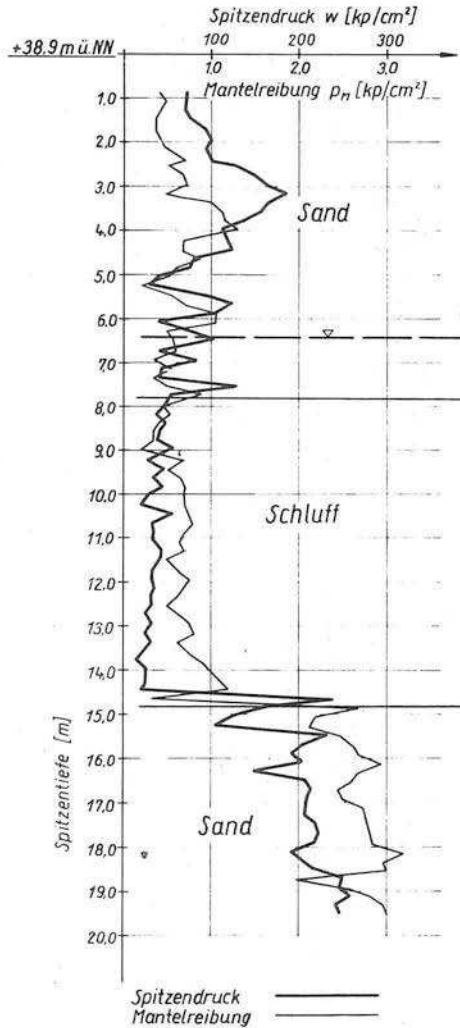
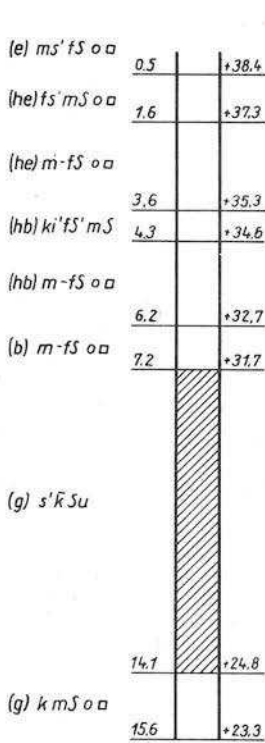


Bild 9

Bohrung

Drucksondierung

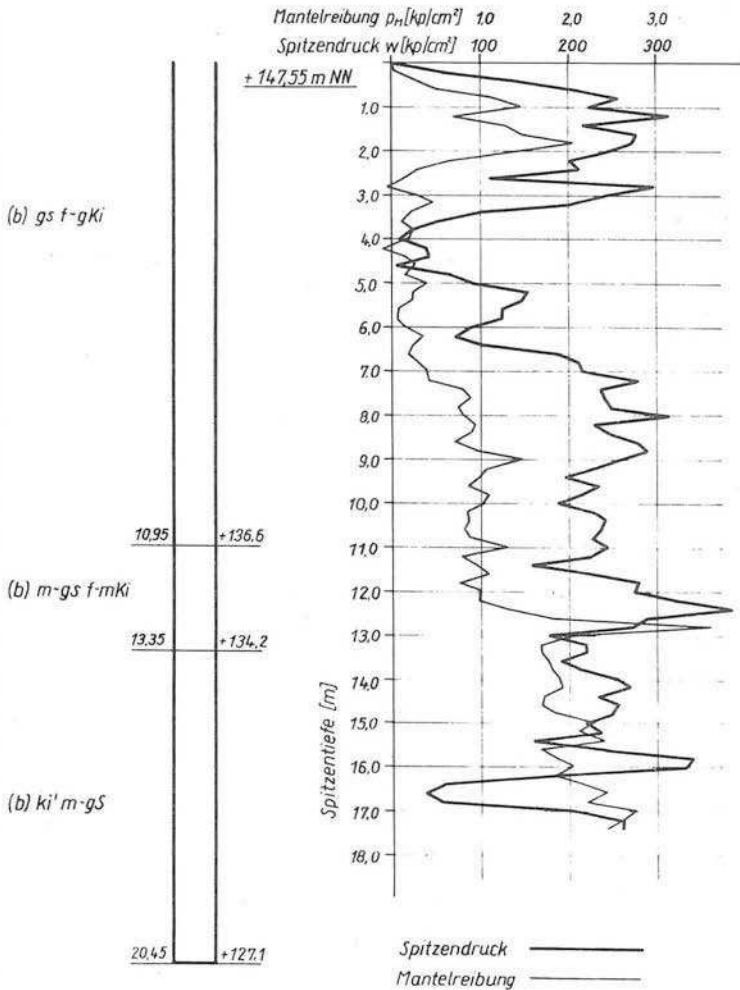


Bild 10

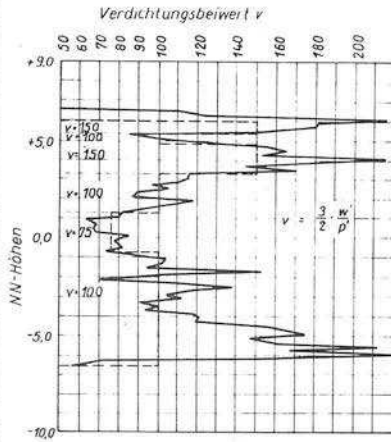


Bild 11

Beispiel einer Auftragung für den nach Buisman aus einem Sondierdiagramm ermittelten Verdichtungsbeiwert v

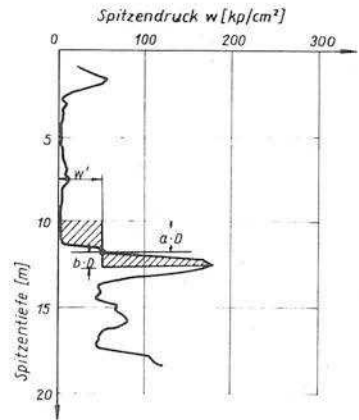


Bild 12

Ermittlung des mittleren ~~Gegen-~~ Spitzendruckes w' aus dem Sondierdiagrammes

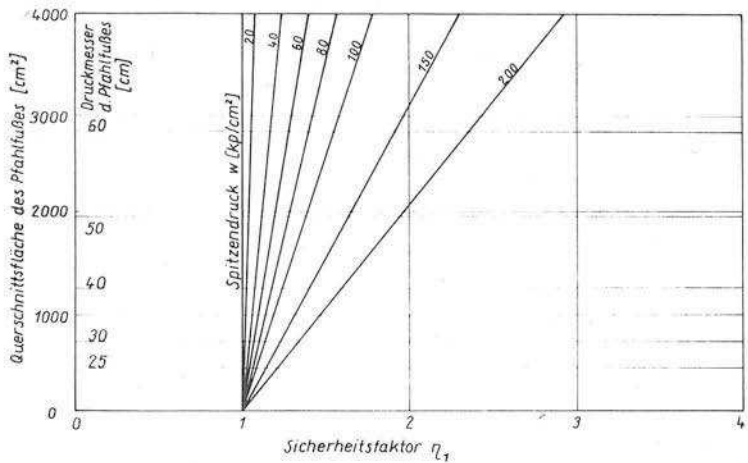


Bild 13

Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors η_1 vom Pfahlfußquerschnitt und dem mittleren ~~Gegen-~~ Spitzendruck w'